

контроля качества производства отечественных ПС-стрипов позволили реализовать некоторые из основных факторов снижения себестоимости:

– относительное снижение себестоимости за счет экономии материальных затрат ($\% \Delta C_m$) в результате изменения расхода сырья (снижение брака) в пересчете на единицу продукции:

$$\% \Delta C_m = (1 - I_m * I_u) * \alpha_{м.з} * 100 = (1 - 0,845) * 0,6 * 100 = 9,3\%$$

где I_m – индекс норм затрат материальных ресурсов на один ПС-стрип;

I_u – индекс цен на единицу материального ресурса;

$\alpha_{м.з}$ – доля материальных затрат в себестоимости ПС-стрипа.

– относительное снижение себестоимости ($\% \Delta C_{п.п}$) за счет роста производительности труда:

$$\% \Delta C_{п.п} = \alpha_{з.п} * (1 - (I_{з.п} / I_{п.п})) * 100\% = 0,22 * (1 - 0,3) * 100 = 15,4\%$$

где $I_{з.п}$ – индекс роста заработной платы;

$I_{п.п}$ – индекс роста продуктивности труда;

$\alpha_{з.п}$ – доля заработной платы в себестоимости ПС-стрипа.

В результате, проведенной работы успешно решены следующие технико-экономические задачи:

– увеличен объем выпуска изделий за счет сокращения простоев оборудования, потерь рабочего времени и длительности производственного цикла;

– снижены затраты на материал за счет сокращения брака, своевременного контроля и корректировки производственного процесса;

– уменьшена величина оборотных средств (в части незавершенного производства) за счет их ускоренной оборачиваемости в результате сокращения длительности цикла производства.

Все перечисленное выше позволит добиться сокращения затрат на единицу продукции (на ПС стрип) и увеличить прибыль, что имеет особую важность и значимость для существующей производственной ситуации.

Основной вывод проведенной работы – в результате комплексного решения материаловедческих, технологических и научно-организационных задач разработана и внедрена в эксплуатацию усовершенствованная технология изготовления ПС стрипов. Это обеспечило увеличение производительности в шесть раз (160 стрипов в сутки), снижение процента брака до 1,5%, а производственной себестоимости на 25%.

Список литературы: 1. Гринев Б.В., Сенчишин В.Г. Пластмассовые сцинтилляторы. – Х.: Акта, 2003. С. 157-164. 2. Заявка на патент №20041216828 от 27.12.04 «Спосіб одержання світловідбиваючого покриття на поверхні виробів з полімерних сцинтиляційних матеріалів». 3. V. Senchyshyn, B.Grynyov, S. Melnychuk, A. Adadurov, N. Khlapova, M. Dracos, A. Olchevski, Y. Gornushkin, A. Nozdryn, A. Sadovski. Low Cost Extruded Plastic Scintillating Strips for Opera Experiment. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2005. Abstracts Books. 4. Н.В. Вереzub, М.В. Литвиненко, С.В. Мельничук, В.Э. Леман, С.С. Миненко. Особенности фрезерования канавки под световод на полистирольных сцинтилляционных профилях // Весник НТУ «ХПИ». – Харьков. – 2005. – №23, – С. 45-53. 5. Литвиненко М.В. Повышение функциональных и эксплуатационных характеристик оптических полистирольных изделий полученных фрезерованием. Дис. ... к-та техн. наук. – Харьков, 2004. 183 с. 6. Гринев Б.В., Сенчишин В.Г., Мельничук С.В., Литвиненко М.В., Лагутин В.Н., Ольшевский А.Г., Ноздрин А.А., Горнушкин Ю.А., М. Dracos. Высокоэффективная технология серийного изготовления длинномерных пластмассовых сцинтилляторов. // Пластические массы, Россия. – Москва, 2006. – №11. – С. 47-51.7.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 621.318:37

Г.Ю. МАРТЫНЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЖЕСТКОГО РОТОРА ТУРБОКОМПРЕССОРА В АКТИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

Research of dynamics of rotors of turbocompressors with the active magnetic bearings is conducted on the basis of the offered mathematical model. The stability of motion of these rotors at the use of the developed method of discrete control by the magnetic bearings is proved. The results of calculations and experimental researches on definition of rational parameters of magnetic suspension for the experimental model of compressor are described.

Введение. Активные магнитные подшипники (АМП) являются альтернативой подшипникам качения, скольжения, газодинамическим и обладают по сравнению с ними целым рядом преимуществ (отсутствие смазочных систем, снижение потерь на трение, сравнительно большой зазор и т.д.) [1]. АМП в настоящее время используются в различных роторных машинах и агрегатах, например, в качестве опор роторов турбомолекулярных и питательных насосов, металлорежущих станков (электрошпинделя), компрессоров нефтедобывающих и газоперекачивающих станций (ГПА) и др.

При математическом описании системы «ротор в АМП» выделяются следующие части: математическая модель ротора, модель подшипников и закон управления, который реализуется с помощью системы управления [2]. Корректное определение и проверка параметров алгоритмов управления с помощью численных экспериментов возможно только в случае адекватного

математического моделирования данной системы и взаимосвязанных магнитомеханических явлений происходящих в ней.

При анализе ряда технических устройств уравнения электромеханических колебаний линеаризуют. Такой подход применяется и для АМП [3]. Так, моделирование магнитомеханической системы «ротор в АМП» осуществляется с помощью дифференциальных уравнений движения и дифференциальных уравнений для токов в линейном приближении. При этом линеаризуются в окрестности положения равновесия токи в цепях и управляющие напряжения на обмотках [4]. Линейная модель подвеса записывается в предположении малости отклонений переменных от их номинальных значений. В действительности эти отклонения могут быть значительными, а значит в предельных режимах (насыщение магнитной цепи, нулевой ток, нулевой зазор и т.д.) линейная модель подвеса теряет смысл [5]. Эти же недостатки могут быть присущи и блокам управления положением ротора, построенным на таких линеаризованных моделях.

1. Постановка задачи. Целью данной работы является исследование динамического поведения ротора в АМП на примере модели турбокомпрессора. При этом математическое описание полностью управляемого электромагнитного подвеса ротора в АМП должно адекватно учитывать нелинейную взаимосвязь происходящих в такой системе процессов – электрических, магнитных и механических.

2. Описание электромеханических систем. Технические электромеханические системы описываются уравнениями Лагранжа-Максвелла, имеющими структуру уравнений механики. В случае, когда токи проводимости замкнуты, и в электрических ветвях отсутствуют конденсаторы, электромеханические системы описываются уравнениями, аналогичными уравнениям Рауса в механике [6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} - \frac{\partial T}{\partial q_r} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_r} = -\frac{\partial W}{\partial q_r} + Q_r & (r=1, \dots, M) \\ \frac{\partial \Psi_k}{\partial t} + \sum_{s=1}^N r_{Cks} \frac{\partial W}{\partial \Psi_s} = E_k & (k=1, \dots, N) \end{cases} \quad (1)$$

где T и Π – кинетическая и потенциальная энергии, $W=W(\Psi_1, \dots, \Psi_N, q_1, \dots, q_M)$ – энергия магнитного поля, q_r – обобщенные механические координаты, Q_r – непотенциальные обобщенные силы, M – число обобщенных механических координат, Ψ_k – потоки индукции (потокосцепления), N – число замкнутых неразветвленных контуров с контурными токами i_k , r_{Cks} – активные сопротивления электрических контуров, E_k – алгебраическая сумма сторонних электродвижущих сил в k -том контуре, причем:

$$\Psi_k = \frac{\partial W}{\partial i_k}, \quad i_s = \frac{\partial W}{\partial \Psi_s}. \quad (2)$$

2. Схема магнитного подвеса ротора. В работе методика математического описания системы «ротор в АМП» рассматривается на примере одного из вариантов полностью управляемого электромагнитного подвеса ротора турбокомпрессора. Его схема представлена на рисунке 1.

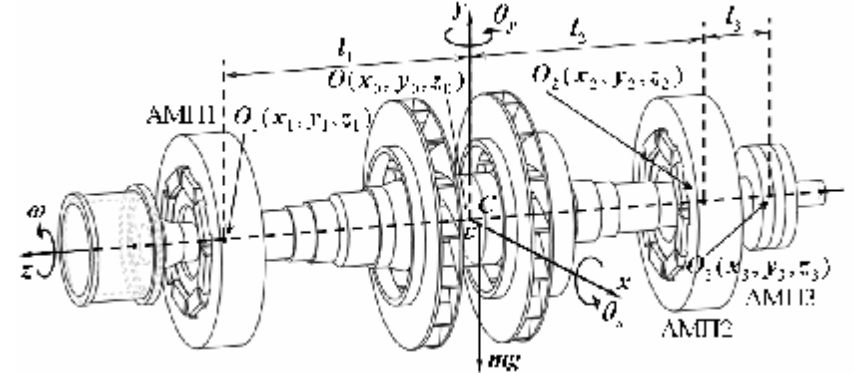


Рис. 1 – Схема подвеса ротора в активных магнитных подшипниках

В качестве двух радиальных опор используются восьмиполюсные магнитные подшипники, а в качестве осевой – упорный магнитный подшипник с броневыми сердечниками [4]. Они представлены на рисунке 2.

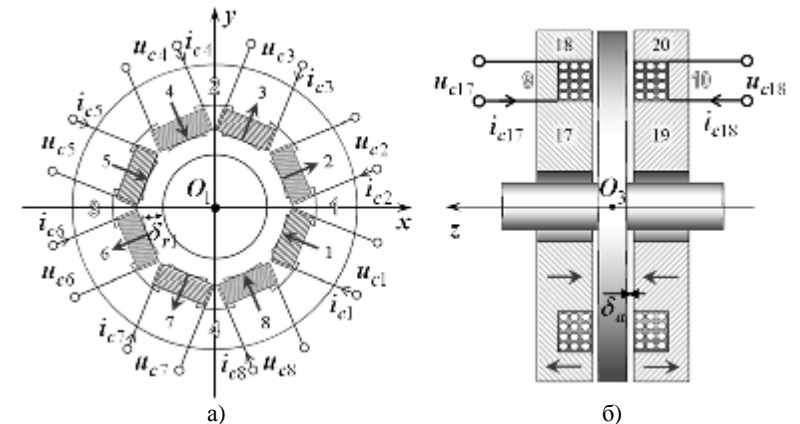


Рис. 2 – Магнитные подшипники: а) радиальный АМП1, б) осевой АМП3

На рисунке 2 числами от 1 до 20 обозначены номера полюсов, а от 1 до 10 – электромагниты. В каждом из радиальных подшипников АМП1 и АМП2 попарным соединением полюсных катушек могут

быть образованы по четыре электромагнита [2]. Полагается, что на каждую полюсную катушку подается управляющее напряжение u_{ck} . Его величина определяется в соответствии с применяемым алгоритмом управления в зависимости от параметров регулирования [4]. При протекании тока i_{ck} через обмотку k -ой полюсной катушки с количеством витков w_k и активным сопротивлением r_{ck} возникает магнитодвижущая сила (МДС) $e_k = w_k i_{ck}$, которая вызывает магнитный поток в магнитной цепи АМП. Направления потоков на рисунках 2 и 3 обозначены красными стрелками. При центральном положении ротора номинальный воздушный зазор между полюсами радиальных АМП и цапфами равен δ_{r1} в АМП1 и δ_{r2} в АМП2 (см. рис. 2). Номинальный воздушный зазор между статором и диском осевой опоры АМП3 с каждой стороны равен δ_a .

4. Математическая модель жесткого ротора. Рассмотрим пространственную расчетную схему вращающегося абсолютно жесткого ротора на магнитном подвесе (рис. 1). Для однозначного позиционирования ротора в пространстве вводится неподвижная прямоугольная правая система координат. Ее начало O^* расположено на геометрической продольной оси ротора, который находится в центральном положении. Оси координат связаны с ротором в данном положении так: ось O^*z совпадает с геометрической продольной осью ротора, а оси O^*x и O^*y расположены в плоскости перпендикулярной оси O^*z и проходящей через центр тяжести ротора C . Для ротора в некотором произвольном положении через $O(x_0, y_0, z_0)$ обозначен геометрический центр поперечного сечения, проходящего через центр тяжести ротора. Центры опорных участков ротора на АМП1 и АМП2 обозначены через $O_1(x_1, y_1, z_1)$ и $O_2(x_2, y_2, z_2)$ соответственно (рис.1). Расстояние между O и O_1 равно l_1 , а между O и O_2 равно l_2 . Для определения положения ротора могут использоваться две связанные группы обобщенных координат $\xi = (x_0, y_0, z_0, \theta_x, \theta_y)$ или $q = (x_1, y_1, x_2, y_2, z_3)$. Здесь θ_x, θ_y – углы поворота вокруг осей O^*x и O^*y , а z_3 – координата центра диска АМП3 O_3 .

В этом случае движение вращающегося абсолютно жесткого ротора на АМП описывается системой дифференциальных уравнений (СДУ) 2-го порядка, включающей 5 уравнений [5]:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x_0}{dt^2} = -\frac{\partial W}{\partial x_0} + Q_x + m w^2 (e_1 \cos wt - e_2 \sin wt), \\ m \frac{d^2 y_0}{dt^2} = -\frac{\partial W}{\partial y_0} + Q_y + m w^2 (e_1 \sin wt + e_2 \cos wt), \\ m \frac{d^2 z_0}{dt^2} = -\frac{\partial W}{\partial z_0} + Q_z, \\ J_e \frac{d^2 q_x}{dt^2} + J_p w \frac{dq_y}{dt} = -\frac{\partial W}{\partial q_x} + Q_{q_x} + (J_e - J_p) w^2 (g_1 \cos wt - g_2 \sin wt), \\ J_e \frac{d^2 q_y}{dt^2} - J_p w \frac{dq_x}{dt} = -\frac{\partial W}{\partial q_y} + Q_{q_y} + (J_e - J_p) w^2 (g_1 \sin wt + g_2 \cos wt), \end{cases} \quad (3)$$

где m – масса ротора, e_1, e_2 и γ_1, γ_2 – линейные и угловые параметры неуровновешенности, J_e, J_p – экваториальный и полярный моменты инерции ротора, w – угловая скорость, $P_{\xi} = -\partial W / \partial \xi_r$ – электромагнитные реакции подвеса, Q_r – обобщенные внешние силы и моменты.

5. Модель магнитных подшипников. Для данного варианта полного электромагнитного подвеса (рис. 1) АМП содержат $N=18$ электромагнитных контуров с токами i_{ck} , активными сопротивлениями r_{ck} и входными напряжениями u_{ck} (управляющими сигналами). Насыщением и магнитным гистерезисом пренебрегаем. Вторая часть СДУ математической модели согласно (1) состоит из 18 уравнений относительно потокоцеплений. Они соответствуют второму закону Кирхгофа для магнитных цепей и являются формой записи закона полного тока для каждого k -го контура системы:

$$\frac{\partial \Psi_{ck}}{\partial t} + r_{ck} \frac{\oint \Psi_{ck}}{\oint \Psi_{ck}} = u_{ck} \quad (k=1, \dots, N), \quad (4)$$

где Ψ_{ck} – потокоцепления (полные магнитные потоки через контуры катушек), r_{ck} – активные сопротивления обмоток, u – N -мерный вектор-столбец управляющих напряжений, которые подаются на обмотки АМП.

Если принять, что магнитный поток, охватываемый каждым витком катушки одинаков, то полный магнитный поток через контур:

$$\Psi_{ck} = w_k \Phi_k. \quad (5)$$

Магнитный поток Φ_k через площадь S_k участка магнитной цепи [7]:

$$\Phi_k = B_k S_k. \quad (6)$$

Магнитное сопротивление участка магнитной цепи [7]:

$$R_k = l_k / (\mu_0 \mu_k S_k), \quad (7)$$

где l_k – длина участка магнитной цепи, S_k – площадь поперечного сечения, μ_0 – магнитная постоянная, μ_k – относительная магнитная проницаемость.

Тогда энергия магнитного поля участка цепи равна [7]:

$$W_k = R_k \Phi_k^2 / 2, \quad (8)$$

а энергия всей магнитной цепи равна сумме энергий участков этой цепи.

Если через W_I , W_{II} и W_{III} обозначить энергию магнитных цепей АМП1, АМП2 и АМП3 соответственно, то энергия магнитного поля в магнитных цепях полного электромагнитного подвеса ротора на АМП равна:

$$W = W_I + W_{II} + W_{III}. \quad (9)$$

6. Определение магнитных потоков. Полное потокоцепление k -го контура Ψ_{ck} зависит не только от тока в k -м контуре, но и от токов в других контурах магнитосвязанных с k -м контуром [7]. В этом случае для корректного определения магнитных потоков в участках магнитных цепей предлагается использовать подробные эквивалентные схемы.

Определение магнитных потоков в магнитной цепи радиального АМП1 может быть произведено на основе рассмотрения ее эквивалентной схемы. Она представлена на рисунке 3. Здесь приняты следующие обозначения: Φ_k – магнитные потоки участков цепи, причем Φ_1, \dots, Φ_8 – через сечения полюсов, Φ_9, \dots, Φ_{16} – через воздушные зазоры под полюсами, $\Phi_{17}, \dots, \Phi_{24}$ – через ярмо статора, $\Phi_{25}, \dots, \Phi_{32}$ – рассеяния через воздушные зазоры между полюсами статора, $\Phi_{33}, \dots, \Phi_{40}$ – через цапфу, расположенную на роторе, $\Phi_{C1}, \dots, \Phi_{C16}$ – контурные; R_k – магнитные сопротивления участков цепи, причем R_{pk} – полюсов, R_{gk} – воздушных зазоров между полюсами и ротором, R_{sk} – участков ярма статора между двумя полюсами, R_{jk} – рассеяния между полюсами (воздушных зазоров), R_{ak} – участков ротора; e_k – магнитодвижущие силы катушек, причем $e_1 = i_{c1} w_1, \dots, e_8 = i_{c8} w_8$.

Расчет магнитной цепи радиального АМП1 может быть выполнен на основе закона, подобного второму закону Кирхгофа для электрических цепей с использованием схемы замещения (рис. 3). Для расчета магнитных цепей могут применяться различные методы, в том числе, метод узловых

потенциалов или метод контурных потоков. Применение метода контурных потоков (аналога метода контурных токов) приводит к системе алгебраических уравнений относительно контурных потоков. Ее решение позволяет найти контурные потоки, через которые определяются и потоки во всех ветвях. Так потоки несмежных ветвей равны контурным потокам, если их направления совпадают, и равны контурным потокам с обратным знаком, если не совпадают. Также определяются и потоки смежных ветвей [8].

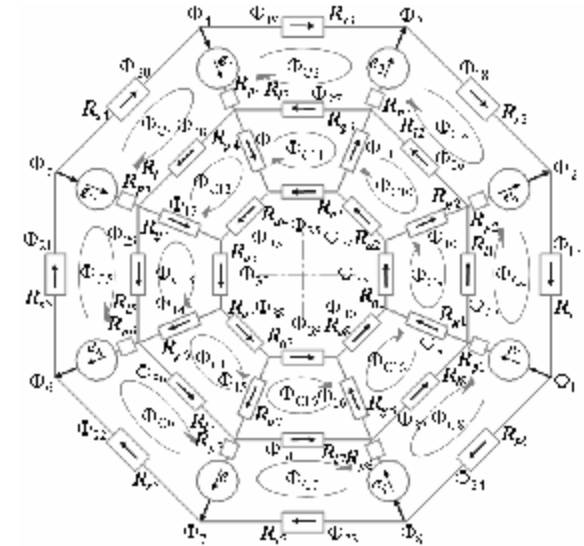


Рис. 3 – Эквивалентная схема замещения электромагнитной цепи АМП1

Определение магнитных потоков $\Phi_{41}, \dots, \Phi_{80}$ в магнитной цепи радиального АМП2 выполняется с использованием такого же подхода на основе рассмотрения аналогичных модели и схемы замещения (см. рис. 2, 3).

Магнитная цепь осевого АМП3 может быть замещена схемой, приведенной на рисунке 4. Здесь приняты обозначения, аналогичные обозначениям магнитных потоков, сопротивлений и магнитодвижущих сил для АМП1 (рис. 3). Расчет магнитной цепи осевого АМП3 может быть выполнен с использованием данной схемы замещения на основе применения метода контурных потоков или узловых потенциалов.

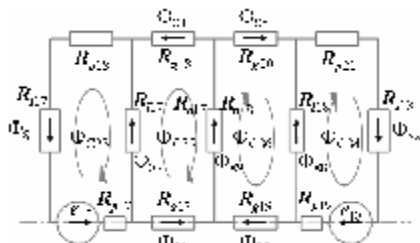


Рис. 4 – Эквивалентная схема замещения электромагнитной цепи АМПЗ

7. Дискретное управление движением ротора в АМП. При управлении движением ротора для его удержания вблизи центрального положения в зазорах всех АМП на каждую полюсную катушку системой управления подается управляющее напряжения u_{ck} , величина которого определяется в соответствии с применяемым алгоритмом управления в зависимости от параметров регулирования – значений обобщенных координат, как механических ξ , так и электромагнитных Ψ_{ck} .

Для управления движением ротора компрессора в АМП предлагается использовать один из способов дискретного управления электромагнитным подшипником [9]. Он заключается в том, что выбирается величина напряжения (U), подаваемого на катушки с обмотками управления. Задаются m фиксированных уровней отклонений от центрального положения, $2m$ величин скоростей движения, $2m$ пороговых значений разности токов в диаметрально противоположных катушках с обмотками управления. Через одинаковый промежуток времени определяются токи, отклонения и скорости движения шеек ротора. После сравнения измеренных величин с эталонными (уровневыми величинами) формируются управляющие воздействия и на управляющие обмотки подаются, либо напряжения $u_{ck}=U$, либо $u_{ck}=0$.

8. Численные исследования. Решение задачи определения параметров управления, обеспечивающих устойчивость движения ротора на магнитном подвесе, проводилось для модели компрессора ГПА, приведенной на рисунке 5. Данная модель является уменьшенной копией турбокомпрессора с заменой подшипников скольжения активными магнитными подшипниками.

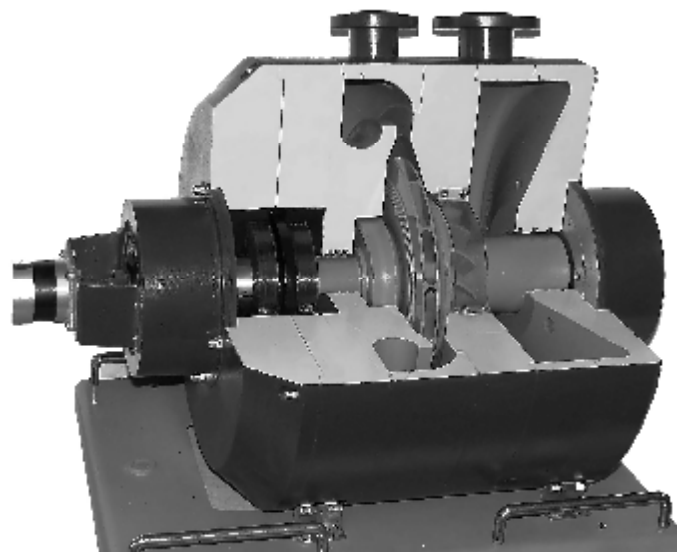


Рис. 5 – Модель компрессора ГПА с магнитными подшипниками

Проведение вариантных расчетов выполнялось с помощью имитационной модели (ИМ) [10], в основу которой положена СДУ (2)-(4). Решение данной системы в ИМ производится методом Рунге-Кутты 7-го порядка с предварительным приведением к эквивалентной СДУ в нормализованной форме с помощью введения новых переменных и линейного комбинирования. Кроме того, в ИМ предусмотрена возможность внесения в измеряемые параметры управления случайной погрешности с заданным предельным значением для исследования ее влияния на устойчивость движения ротора на АМП.

При проведении численных экспериментов вносились кинематические возмущения – отклонения шеек ротора на величину зазора. Исследования позволили найти по заданным параметрам АМП параметры алгоритма управления (см. п. 7), обеспечивающие устойчивость движения ротора в переходном процессе и установившегося движения при заданных значениях допустимых отклонений. Осциллограммы вертикального движения опорных участков ротора в зазорах радиальных АМП1 и АМП2 приведены на рисунках 6-8.

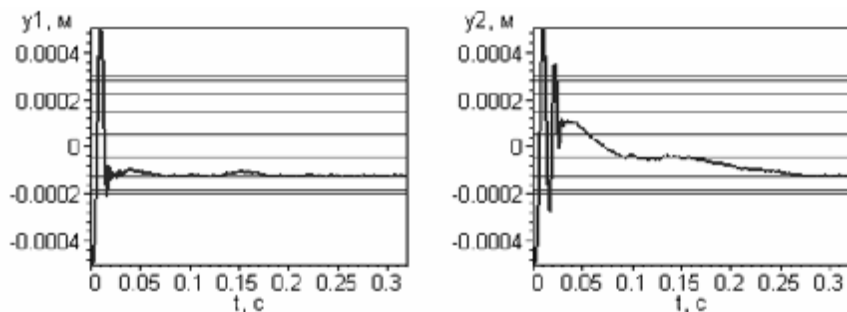


Рис. 6 – Траектория движения ротора в вертикальном направлении

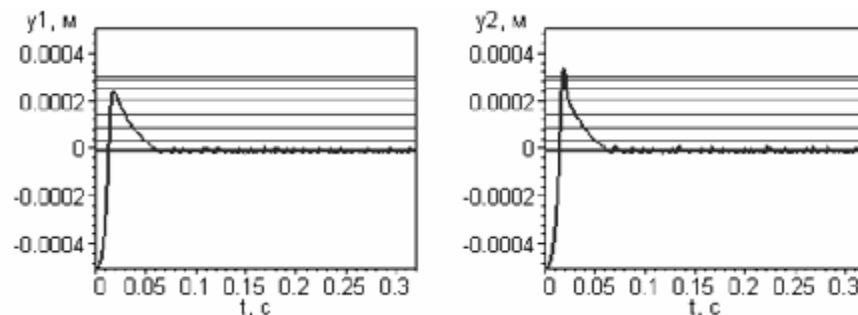


Рис.8 – Траектория движения ротора в вертикальном направлении

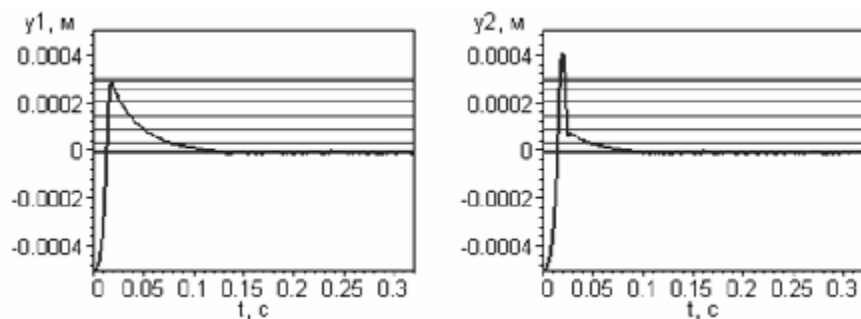


Рис. 7 – Траектория движения ротора в вертикальном направлении

Из рисунка 6 следует, что при относительно широком диапазоне уровней управления по отклонениям (показаны горизонтальными линиями) и малом демпфировании в переходном процессе отклонения ротора могут быть равны величине зазора. При сужении диапазона уровней управления и увеличении демпфирования в системе с помощью увеличения активных сопротивлений в цепях электромагнитов в четыре раза удается достичь уменьшения максимальных отклонений в переходном процессе до 80 % от зазора (рис. 7).

Дальнейшее увеличение активных сопротивлений позволяет снизить максимальные отклонения до 60 % от зазора (рис. 8). В последних двух случаях параметры управления обеспечивают стационарные колебания ротора с амплитудами, не превышающими 10 % от зазора, при внесении указанных выше возмущающих воздействий.

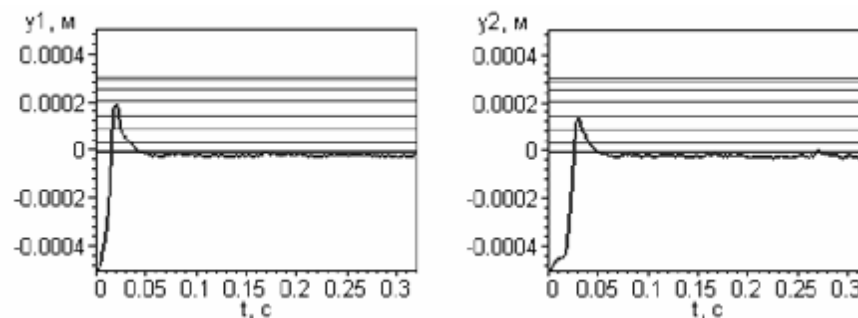


Рис. 9 – Траектория движения ротора при погрешности измерений

Заключение. В работе рассмотрена нелинейная математическая модель подвеса жесткого ротора в активных магнитных подшипниках. Основное отличие имитационной модели, построенной с использованием предложенной математической модели, – возможность более адекватного моделирования поведения ротора на АМП при его приближении к полюсам.

Модели такого типа могут использоваться для проведения численных экспериментов по нахождению реальных границ применения линейных и нелинейных алгоритмов управления и определения их параметров, позволяющих обеспечить устойчивость движения ротора в заданных пределах.

Другим приложением имитационных вычислительных моделей является

разработка и оптимизация алгоритмов управления системы ротор на АМП, а также исследование динамического поведения этой системы с определением резонансных режимов и последующей отстройкой от них.

С помощью описанной имитационной модели исследовано динамическое поведение системы «ротор в АМП». Показано, что при внесении кинематических возбуждений подбором параметров предложенного дискретного алгоритма управления возможно добиться величин максимальных отклонений шеек опорных участков ротора в переходных процессах и амплитуд стационарных колебаний, не превышающих заданных значений. Результатами численных экспериментов подтверждена устойчивость данного алгоритма к возможному возникновению случайных погрешностей измерений параметров управления.

Список литературы: 1. Siegwart R, Bleuler H, Traxler A. Industrial Magnetic Bearings. Gordon and Breach Science Publisher, –Amsterdam, 2000. 2. Steven M, Nataraj C. Suppression of Base Excitation of Rotors on Magnetic Bearings. International Journal of Rotating Machinery. Vol. 2007, Article ID 91276. –10 p. 3. G. Schweitzer, H. Bleuler and A. Traxler Active magnetic bearings. –Zurich: ETH, 1994. –244 p. 4. Maslen E.H. Magnetic bearings. University of Virginia Department of Mechanical, Aerospace, and Nuclear Engineering Charlottesville, Virginia, 2000. –229 p. 5. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. –СПб.: Политехника, 2003. –206 с. 6. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. В.Н. Челомей (пред). –М.: Машиностроение, 1979. - Т.2: Колебания нелинейных механических систем. / Под ред. И.И. Блехмана. –351 с. 7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Учебник для студентов энергетических и электротехнических ВУЗов. –М.: Высш. шк., 1973. –752 с. 8. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника. Учебник для ВУЗов. –М.: Энергоатомиздат, 1985. –552 с. 9. Патент № 2277190. Российская Федерация. МПК F16C 32/04. Способ дискретного управления электромагнитным подвесом вращающихся роторов / ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», НТУ «ХПИ»; Роговой Е.Д., Бухолдин Ю.С., Левашов В.А., Мартыненко Г.Ю., Смирнов М.М. –№ 2003121317/11. –Заявл. 10.07.2003 г. Опубл. 27.05.2006 г. // Изобретения. Официальный бюллетень, 2006. –№15. 10. Мартыненко Г.Ю. Исследование устойчивости движения ротора в управляемых электромагнитных подшипниках с помощью нелинейной имитационной вычислительной модели / Проблемы машиностроения. –Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2005. –Т.8, №1. –С. 47-58.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 621.318:37

Г.Ю. МАРТЫНЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЖЕСТКОГО РОТОРА ТУРБОКОМПРЕССОРА В АКТИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

Research of dynamics of rotors of turbocompressors with the active magnetic bearings is conducted on the basis of the offered mathematical model. The stability of motion of these rotors at the use of the

developed method of discrete control by the magnetic bearings is proved. The results of calculations and experimental researches on definition of rational parameters of magnetic suspension for the experimental model of compressor are described.

Введение. Активные магнитные подшипники (АМП) являются альтернативой подшипникам качения, скольжения, газодинамическим и обладают по сравнению с ними целым рядом преимуществ (отсутствие смазочных систем, снижение потерь на трение, сравнительно большой зазор и т.д.) [1]. АМП в настоящее время используются в различных роторных машинах и агрегатах, например, в качестве опор роторов турбомолекулярных и питательных насосов, металлорежущих станков (электрошпинделя), компрессоров нефтедобывающих и газоперекачивающих станций (ГПА) и др.

При математическом описании системы «ротор в АМП» выделяются следующие части: математическая модель ротора, модель подшипников и закон управления, который реализуется с помощью системы управления [2]. Корректное определение и проверка параметров алгоритмов управления с помощью численных экспериментов возможно только в случае адекватного математического моделирования данной системы и взаимосвязанных магнитомеханических явлений происходящих в ней.

При анализе ряда технических устройств уравнения электромеханических колебаний линеаризуют. Такой подход применяется и для АМП [3]. Так, моделирование магнитомеханической системы «ротор в АМП» осуществляется с помощью дифференциальных уравнений движения и дифференциальных уравнений для токов в линейном приближении. При этом линеаризуются в окрестности положения равновесия токи в цепях и управляющие напряжения на обмотках [4]. Линейная модель подвеса записывается в предположении малости отклонений переменных от их номинальных значений. В действительности эти отклонения могут быть значительными, а значит в предельных режимах (насыщение магнитной цепи, нулевой ток, нулевой зазор и т.д.) линейная модель подвеса теряет смысл [5]. Эти же недостатки могут быть присущи и блокам управления положением ротора, построенным на таких линеаризованных моделях.

1. Постановка задачи. Целью данной работы является исследование динамического поведения ротора в АМП на примере модели турбокомпрессора. При этом математическое описание полностью управляемого электромагнитного подвеса ротора в АМП должно адекватно учитывать нелинейную взаимосвязь происходящих в такой системе процессов – электрических, магнитных и механических.

2. Описание электромеханических систем. Технические электромеханические системы описываются уравнениями Лагранжа-Максвелла, имеющими структуру уравнений механики. В случае, когда токи проводимости замкнуты, и в электрических ветвях отсутствуют конденсаторы, электромеханические системы описываются уравнениями,